Flexible Steuerung pneumatischer Greifer durch Proportionalventile

Axel REMDE, Dominik HENRICH, Heinz WÖRN, Karlsruhe

Institut für Prozeßrechentechnik, Automation und Robotik, Prof. Dr.-Ing. H. Wörn, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, Postfach 6980, D-76128 Karlsruhe, Email: remde@ira.uka.de, dHenrich@ira.uka.de, Woern@ira.uka.de.

Zusammenfassung. Beim Greifen deformierbarer oder zerbrechlicher Werkstücke kommen der Greifgeschwindigkeit sowie der Greifkraft besondere Bedeutung zu. In dieser Arbeit wird eine universelle Steuerung für pneumatische Greifer beschrieben, die eine einfache Einstellung dieser Größen über zwei spannungsgesteuerte Proportionalventile gestattet. Diese Anordnung wird für eine Einflußanalyse von Greifkraft und Greifgeschwindigkeit beim Greifen von Kabeln und Kabelbäumen genutzt, welche sich als robust und unproblematisch erwiesen haben.

Abstract. When gripping deformable or fragile workpieces, gripping force and jaw speed are of major importance. This article presents a multi-purpose control system for pneumatic grippers which allows simple control of these parameters by two voltage-controlled proportional valves. This system is used to investigate the influence of gripping force and jaw speed for cables and cable forms which proved to be robust and unproblematic.

1 Einleitung

Sollen Werkstücke durch einen Industrieroboter oder Handhabungssystem gegriffen und bewegt werden, besteht die Aufgabe, einen geeigneten Greifer zuzüglich Steuerung auszuwählen bzw. zu konzipieren. Generell müssen an den Greifer stets die folgenden Grundanforderungen gestellt werden: Einerseits muß ein sicheres Greifen gewährleistet sein, d.h. eine Relativbewegung zwischen Greiferbacken und Werkstück muß ausgeschlossen werden. Dadurch ergibt sich für die Greifkraft eine untere Grenze $F_{\min}$. Andererseits darf das Werkstück nicht beschädigt beziehungsweise zerstört werden, woraus eine obere Grenze $F_{\max}$ für die zulässige Greifkraft resultiert.

Während sich diese Anforderungen für starre und robuste Werkstücke in der Praxis meist leicht erfüllen lassen (sieht man von Stabilitätsproblemen bei komplexen Werkstückgeometrien ab [6]), stellt ihre Erfüllung für mechanisch empfindliche oder leicht deformierbare Werkstücke wie Kabel(bäume), dünnwandige Rohre, Agrarprodukte, Schaumstoffe in vielen Fällen ein Problem dar. Dies führt sowohl bezüglich des Greifers selbst als auch seiner Steuerung zu aufwendigen Spezialkonstruktionen. Als Beispiele seien zwei Spezialgreifer zur Textilhandhabung [3] und zur Montage von O-Ringen [7] genannt.

Derartige Spezialkonstruktionen sind in ihrer Realisierung meist sehr aufwendig und kaum auf andere Problemstellungen übertragbar. Auch wenn in einigen Fällen der Einsatz einer solchen Speziallösung unumgänglich ist, sollte nach Möglichkeit darauf verzichtet und der Einsatz kommerziell erhältlicher Greifer angestrebt werden. Für die Auswahl eines geeigneten Greifers und die Anpassung an die konkrete Aufgabenstellung können experimentelle Untersuchungen notwendig werden. Hier wird eine solche Untersuchung für das Greifen von Kabeln und Kabelbäumen vorgestellt. Dazu wird eine flexible Steuerung für pneumatische Greifer beschrieben, die eine Variation der pneumatischen Parameter in einem großen Bereich gestattet.

Im folgenden werden zunächst allgemein die beim Greifen relevanten Einflußgrößen sowie der für die experimentellen Untersuchungen eingesetzte Greifer beschrieben. Anschließend wird die Ansteuerung über Microcontroller und Proportionalventile dargestellt sowie verschiedene Anwendungsgebiete für eine solche Steuerung aufgezeigt. Schließlich wird als Beispielanwendung eine Einflußanalyse beim Greifen von Kabeln und Kabelbäumen vorgestellt.

2 Einflußgrößen

Für die Untersuchung des Greifens von Kabeln und Kabelbäumen kann zunächst die folgende Liste der für den Greifvorgang relevanten Einflußgrößen und Parameter aufgestellt werden:

- Greifkraft,
- Schließgeschwindigkeit der Backen,
- Zahl, Art und Form der Greiferbacken,
- Art der Schließbewegung und
- Materialpaarung von Greiferbacken und Werkstück.

Im weiteren wird insbesondere auf die ersten beiden Punkte eingegangen. Die Schließbewegung der Backen kann entweder linear oder zirkular sein. Für den Greifvorgang selbst ist dies von untergeordneter Bedeutung. Als Greiferbacken werden glatte Aluminium-Parallelbacken (Breite: 20 mm) verwendet, da diese das gegriffene Kabel (im Vergleich zu anderen Backentypen, z.B. prismatischen Backen) besonders stark deformieren und daher bzgl. des Greifvorganges ein kritischer Fall sind. Die Materialpaarung zwischen Greiferbacken und Kabelmantel beeinflußt, z.B. durch einen Hartgummibelag der Backen vor allem den Haftreibungskoeffizienten und damit die für ein sicheres Greifen erforderliche Greifkraft F_{min}, nicht aber die Verformung des Kabels bei konstanter Greifkraft. Daher wird auch diese nicht weiter berücksichtigt.

3 Greiferauswahl

Ist eine gute Regelbarkeit erforderlich, erscheint ein elektrisch betriebener Greifer als das am besten geeignete Instrument. Ein Vergleich mit den (sehr viel häufiger eingesetzten) Pneumatikgreifern zeigt jedoch deutliche Schwächen dieser Systeme (Tabelle 1). Für die Untersuchungen wurde daher ein kommerzieller pneumatischer Greifer mittlerer Größe verwendet. Die wichtigsten technischen Daten sind aus Tabelle 2 ersichtlich.

4 Ansteuerung des Greifers

Wie bereits dargestellt wurde, sind Greifkraft F und Schließgeschwindigkeit v von großem Einfluß auf den Greifvorgang. Eine Einstellung dieser Größen kann nach verschiedenen Methoden erfolgen, z.B. mit pulsweitenmodulierten schnellen Schaltventilen [1, 2, 5]. Sehr einfach zu realisieren ist jedoch eine Ansteuerung über Proportionalventile. In Bild 1 ist das pneumatische Schaltbild einer universellen Steuerung über zwei Proportionalventile dargestellt.

Das Ventil *V1* ist ein Proportional-Druckregelventil (FESTO MPPE-3-1/8-10-010-B), dessen Ausgangsdruck unmittelbar proportional zu einer Steuerspannung $U_p = (0..10)$ V unabhängig von Eingansgdruck p und Fluß Q ist. Das Ventil besitzt einen integrierten Drucksensor und stellt somit für den pneumatischen Druck einen geschlossenen Regelkreis dar.

Das Ventil *V2* ist ein Proportional-5/3-Wegeventil (FESTO MPYE-5-M5-010-B) und erfüllt zwei Funktionen: Einerseits dient es zur Steuerung der Bewegungsrichtung (5/3-Wege-Funktion) und andererseits ermöglicht es eine stufenlose Variation des pneumatischen Widerstandes R (Drosselfunktion).

Bei einer Steuerspannung $U_R = 5$V befindet sich der lagegeregelte Ventilschieber in Mittelstellung und sperrt beide Zweige ab ($R \rightarrow \infty$). Für $U_R < 5$V bzw. $U_R > 5$V wird jeweils ein Zweig geöffnet. Bei $U_R = 0$V bzw. $U_R = 10$V ergibt sich der jeweils kleinste pneumatische Widerstand. Einzelheiten zum internen Aufbau sowie die technischen Daten der Ventile können der Referenz [4] entnommen werden.

Gegenüber anderen Ansätzen ist bei der Steuerung durch Proportionalventile insbesondere die einfache Ansteuerung sowie der schlichte Aufbau mit einer minimalen Zahl pneumatischer Komponenten bemerkenswert.

Zur Steuerung des Greifers wird ein Controller auf C167-Basis verwendet. Dieser generiert die Steuerspannungen U_p und U_R durch zwei pulsweitenmodulierte Ausgänge mit nachgeschaltetem Tiefpaß. Durch die analogen Eingänge des Controllers werden Größen wie die Öffnungsweite der Greiferbacken s und der Ist-Druck p_{ist} erfaßt. Die Kommunikation mit einem übergeordneten Rechner (Robotersteuerung oder speicherprogrammierbare Steuerung) erfolgt durch eine DeviceNet-Verbindung. Neben der Steuerung durch den Controller besteht die Möglichkeit, den Greifer durch ein manuelles Handsteuergerät zu bedienen. Hierbei werden die Steuerspannungen durch unbelastete Spannungsteiler (Potentiometer) erzeugt. Zur Aufzeichnung des Schließvorganges ist der Greifer zusätzlich mit einem potentiometrischen Wegmeßsystem ausgestattet. In Bild 2 ist das Zusammenspiel aller Komponenten dargestellt.

Da für Greifer des verwendeten Typs die (statische) Greifkraft F direkt proportional zum Eingangsdruck p ist, kann die Greifkraft in der dargestellten Anordnung einfach durch die Steuerspannung U_p eingestellt werden. Die Schließgeschwindigkeit v wird dagegen von der Stellung beider Ventile beeinflußt. Das Bild 3 zeigt v als Funktion der Steuerspannung $U_R < 5$ V für verschiedene Drücke. Es ist ersichtlich, daß der Einfluß des Druckes auf die Schließgeschwindigkeit mit steigendem Druck abnimmt. Somit kann die Schließgeschwindigkeit als Funktion lediglich des Parameters U_R gesehen werden, sofern der pneumatische Druck nicht zu gering ist. Aus dem weiter unten besprochenen Bild 5 ist ersichtlich, daß die Schließgeschwindigkeit für den gesamten Schließvorgang als konstant angenommen werden darf. Für die andere Bewegungsrichtung der Greiferbacken mit $U_R > 5$ V ist das Verhalten weitgehend analog.

5 Anwendungsgebiete der Greifersteuerung

Die dargestellte Steuerung des Greifers durch zwei Proportionalventile und Microcontroller gestattet es, Greifkraft und Schließgeschwindigkeit in weiten Grenzen automatisch, d.h. ohne manuelle Eingriffe, einzustellen. Durch den symmetrischen Aufbau mit 5/3-Wegeventil und doppeltwirkendem Pneumatikzylinder ist es möglich, die Geschwindigkeit für beide Bewegungsrichtungen unabhängig voneinander vorzugeben. Dadurch eignet sich die Steuerung neben dem hier dargestellten Einsatz zur Einflußanalyse für verschiedene weitere Anwendungen:

Soll ein breites Spektrum verschiedener Werkstücke mit unterschiedlichen Anforderungen an Greifkraft bzw. Schließgeschwindigkeit gegriffen werden, so ist über diese Steuerung eine einfache Anpassung an die jeweilige Aufgabe möglich.

In manchen Fällen kann es sinnvoll sein, Greifkraft bzw. Schließgeschwindigkeit zeitlich zu variieren, z. B. zunächst ein langsames Greifen mit geringem Druck durchzuführen und anschließend den Druck durch einen rampenförmigen Verlauf zu erhöhen. Derartige Funktionen können in die Steuerung integriert und von dieser auf Kommando autonom ausgeführt werden.

Durch das 5/3-Wegeventil sowie das Wegmeßsystem ist es schließlich möglich, einen geschlossenen Regelkreis zur Geschwindigkeits- oder Lageregelung ohne zusätzliche Hardware zu realisieren.

6 Beispielanwendung: Greifen von Kabeln

Der Einfluß der Parameter Drosselstellung und Druck auf den Greifvorgang wurde mit der dargestellten Steuerung exemplarisch für verschiedene Kabel und einen Kabelbaum untersucht (Tabelle 3, Bild 4). Aufgezeichnet wurde in allen Versuchen die Öffnungsweite s des Greifers als Funktion der Zeit t.

Das Bild 5 zeigt den Greifvorgang für die verschiedenen Kabel bei mittleren Werten für Druck und Drosselstellung. Der Zusammenhang der angegebenen Steuerspannung für die Drosselstellung U_R mit der Schließgeschwindigkeit v kann Bild 3 entnommen werden. Der prinzipielle Ablauf des Schließvorganges ist für alle untersuchten Kabel trotz ihrer unterschiedlichen inneren Struktur sehr ähnlich. Die Verzögerung der Greiferbacken beim Auftreffen auf das Kabel erfolgt in jedem Falle nicht ruckartig, sondern weich. Man vergleiche das Greifen von Kabeln mit der Leerfahrt "E" in Bild 5. Wie lange die Einstellung des stationären Endwertes dauert, ist für die verschiedenen Kabel unterschiedlich. Man vergleiche hierzu Kabel "C3" und Kabelbaum "CF". Bei Änderung von Druck oder Drosselstellung ändert sich lediglich der quantitative Funktionsverlauf, qualitativ bleibt er gleich.

Das Bild 6 zeigt beispielhaft den Einfluß der Drosselstellung beim Greifen des Kabelbaums "CF". Die veränderte Schließgeschwindigkeit der Backen beeinflußt nicht den stationären Endzustand, aber die Zeit, in der dieser erreicht wird. Bei zunehmender Backengeschwindigkeit wird der Endzustand schneller erreicht.

In Bild 7 ist ebenfalls für den Kabelbaum "CF" der Einfluß des pneumatischen Druckes dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Kompression des Kabels mit steigendem Druck zu. Gleichzeitig steigt auch die Zeit zur Einstellung des Endzustandes.

Als Ergebnis der Greifexperimente ist festzuhalten, daß das Greifen von Kabeln und Kabelbäumen insgesamt unkritisch ist. Greifkraft und Schließgeschwindigkeit beeinflussen zwar den genauen Ablauf des Greifvorgangs, führen jedoch bei typischen und realistischen Werten in keinem Fall zu einer Beschädigung des Kabels. Daher ist es zulässig, insbesondere den pneumatischen Druck höher als unbedingt erforderlich vorzusehen, um stets ein sicheres Greifen zu gewährleisten. Die Schließgeschwindigkeit der Backen sollte hoch sein, um schnell einen sicheren Kontakt herzustellen. Eine zusätzliche Drosselung ergab in den untersuchten Beispielen keine Vorteile.

7 Schlußfolgerungen und Ausblick

Mit den heute verfügbaren Proportionalventilen ist es bei vergleichsweise geringem Aufwand möglich, eine pneumatische Steuerung für Greifer (oder sonstige Zylinder), zu realisieren, die es gestattet, die beim Greifen relevanten Größen in einem weiten Bereich zu variieren. Einsatzgebiete sind überall dort, wo eine Beeinflussung des Bewegungsablaufes gewünscht wird, aber kein geschlossener Regelkreis erforderlich ist. Die nach diesem Prinzip arbeitende Steuerung wurde für eine Einflußanalyse beim Greifen von Kabeln und Kabelbäumen eingesetzt. Diese erweisen sich beim Greifen als robust und unkritisch.

Eine weitere Verbesserung der Greifersteuerung ist einerseits durch die Einführung geschlossener Regelkreise, z. B. durch eine Kraftregelung mit Messung der Greifkraft in den Backen, und andererseits durch die Integration komplexer, autonom ausführbarer Funktionen möglich. Als Beispiel sei die

Generierung einer Druckrampe nach Erreichen eines stationären Endwertes für die Greiferöffnungsweite genannt.

Beim Greifen von Kabeln steht für künftige Arbeiten die Entwicklung optimierter Greiferbacken für verschiedene Aufgabenstellungen im Vordergrund.

8 Danksagung

Die hier dargestellte Arbeit entstand im Rahmen des Brite-EuRam Forschungsprojektes "Integrated modular solution for handling of flexible materials in industrial environments" (HANDFLEX). Weitere Informationen hierzu finden sich unter http://wwwipr.ira.uka.de/~paro/.

Der Daimler-Benz AG danken wir für die großzügige Überlassung von Kabelbäumen und technischen Informationen.

9 Literaturverzeichnis

1. Bauer, F., "New concepts for flexible pneumatic grippers", In: Conference Papers 29th International Symposium on Robotics, Birmingham, 27. April - 1. Mai, 1998.
2. Ceccarelli, M., Figliolini, G., Mata, A. S., "Problems and constraints for designing a robot end effector gripping horticulture products", In: Conference Papers 29th International Symposium on Robotics, Birmingham,, 27. April - 1. Mai,, 1998.
3. Fahantidis, N., u. a. "Robot handling of flat textile materials", In: IEEE Robotics & Automation Magazine, pp 34-41, March 1997.
4. "Der Pneumatik-Katalog", Ausgabe 97/98, Festo AG &Co., Esslingen, S. 7/10-1ff.
5. Figliolini, G., Sorli, M., "A pressure control system with digital electrovalves modulated in PWM and controlled via PLC", In: Proc. 6th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria, Danube Region, RAAD'1997, pp 454-458, Cassino, June 1997.
6. Pham, D. T., Heginbotham, W. B. (Editors), "Robot Grippers", IFS (Publications) Limited, UK., Springer-Verlag, Berlin u. a., 1986.
7. Wößner, J. F., "Automatische Montage von O-Ringen", Dissertation Uni Stuttgart, 1993, Bd. 174 Schriftenreihe "IPA-IAO - Forschung und Praxis", Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Springer-Verlag Berlin u. A., 1993.

10 Autorenbiographie

Dipl.-Ing. Axel Remde, Jahrgang 1970, studierte in Karlsruhe und Dresden Elektrotechnik. Seit 1997 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßrechentechnik, Automation und Robotik (IPR) der Universität Karlsruhe (TH) tätig.

Dr. rer. nat. Dominik Henrich, Jahrgang 1965, studierte an der Universität Karlsruhe (TH) Informatik, wo er 1994 im Rahmen eines Graduiertenkollegs die Promotion ablegte. Seit 1995 leitet er am Institut für Prozeßrechentechnik, Automation und Robotik (IPR) eine Forschungsgruppe mit den Schwerpunkten Handhabung deformierbarer Objekte, kollisionsfreie Bahnplanung und Parallelverarbeitung.

Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn, Jahrgang 1948, studierte an der Universität Stuttgart Elektrotechnik. 1979 legte er dort die Promotionsprüfung ab. Von 1979 bis 1996 war er bei der Fa. KUKA Schweißanlagen und Roboter GmbH, Augsburg, tätig. Seit 1997 leitet er das Institut für Prozeßrechentechnik, Automation und Robotik (IPR) der Universität Karlsruhe (TH).

11 Tabellen

	Elektrisch	Pneumatisch
Regelbarkeit	+	-
Baugröße, Gewicht	-	+
Auswahl, Lieferbarkeit	-	+
Preis	-	+

Tabelle 1: Auswahlkriterien für elektrische und pneumatische Robotergreifer (+: Kriterium positiv, -: Kriterium negativ)

Typ	Parallelgreifer
Aufbau	Doppeltwirkender Pneumatikzylinder mit Keilhakenkulisse konstanter Steigung, Backen zwangsgeführt und kugelgelagert
Hub	2 X 10 mm
Nenn-Schließkraft bei p = 6 bar	355 N
Nenn-Schließgeschwindigkeit	0.3 s
Zyklusluftverbrauch	0.1 l

Tabelle 2: Technische Daten des Greifers GP110 von Fa. Sommer-automatic, Straubenhardt

Bezeichnung	Beschreibung
C1	NYM 5 x 1.5 mm^2 Litze, ∅ 12.1 mm, Mantel Weich-PVC
C2	19 x 0.3 mm^2, starr, ∅ (8.9...9.9) mm, Folienschirm, Mantel Weich-PVC
C3	5 x 0.5 mm^2, Litze, ∅ (7.5...8.8) mm, Schirm Cu-Geflecht, Mantel Weich-PVC
CF	Kabelbaum für Fahrertür Mercedes A-Klasse, ∅ (8.6...12.5) mm

Tabelle 3: Beschreibung der für die Greifexperimente verwendeten Kabel

12 Bilder

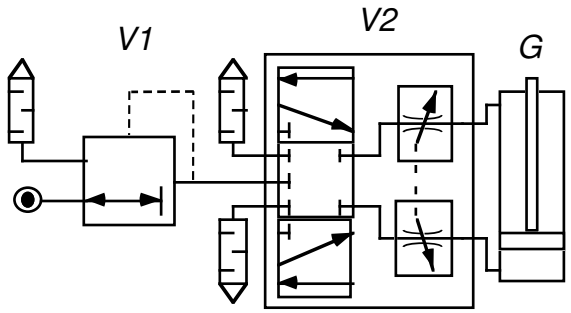

Bild 1: Pneumatisches Schaltbild einer universellen Greifersteuerung mit Druck-Regelventil *V1*, Proportional-5/3-Wegeventil *V2* und Greiferzylinder *G*

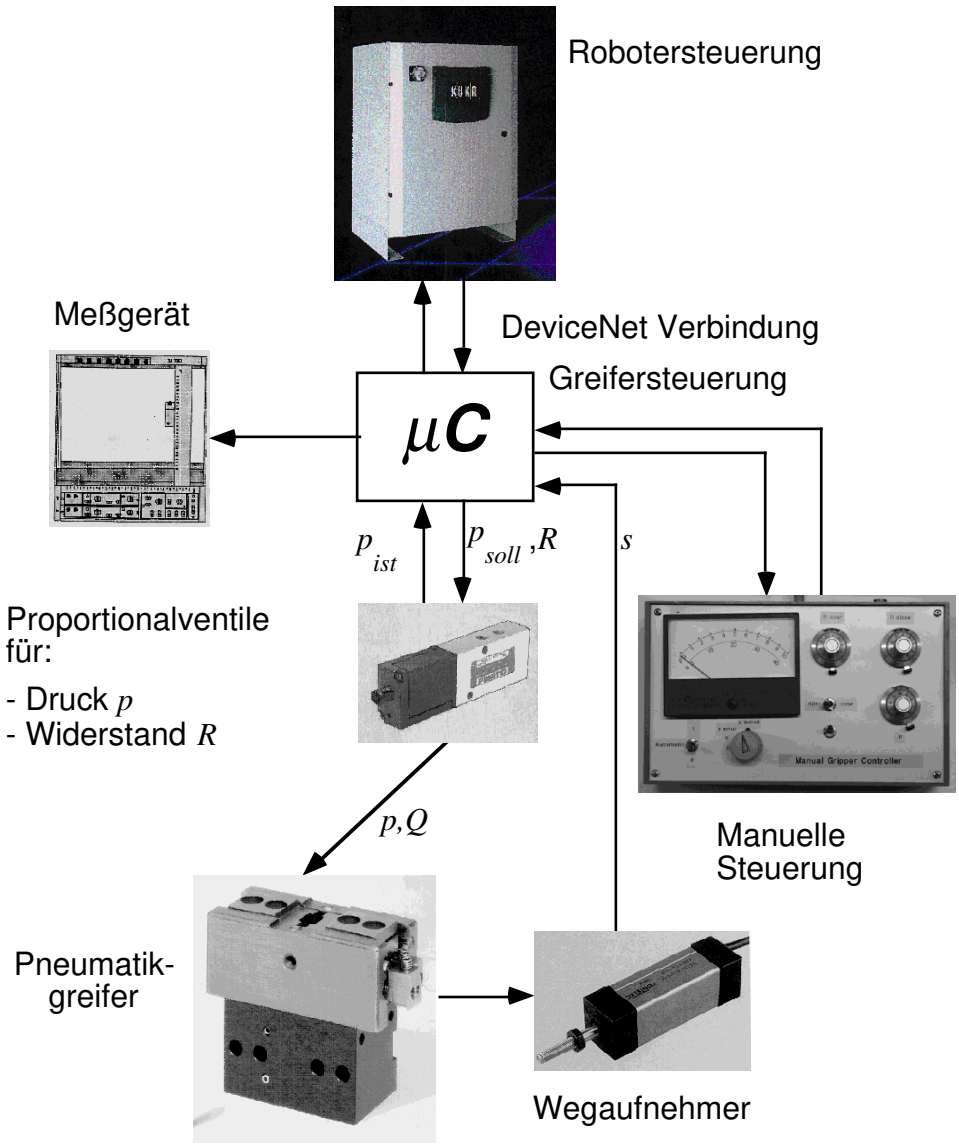

Bild 2: Zusammenspiel der einzelnen Komponenten der Greifersteuerung mit Controller µC als zentraler Komponente

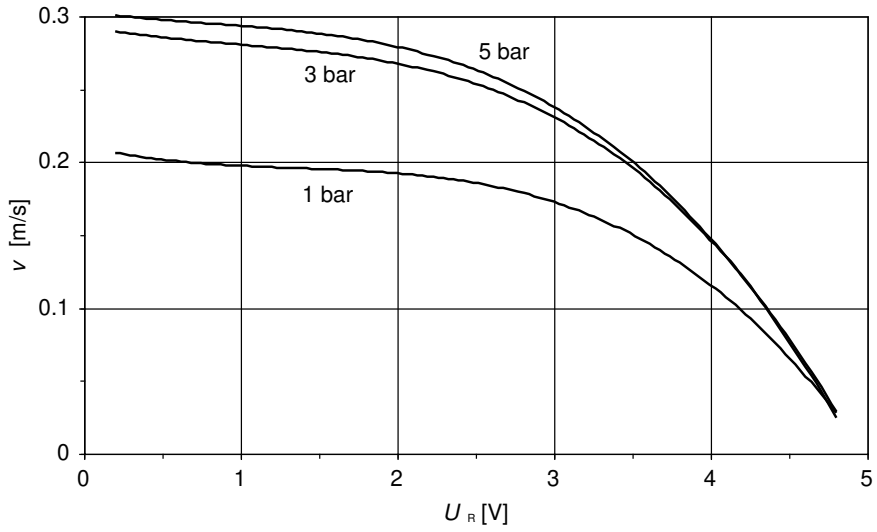

Bild 3: Zusammenhang zwischen Drosselstellung und Schließgeschwindigkeit der Greiferbacken bei verschiedenen pneumatischen Drücken

Bild 4: Für die Greifexperimente verwendete Kabel

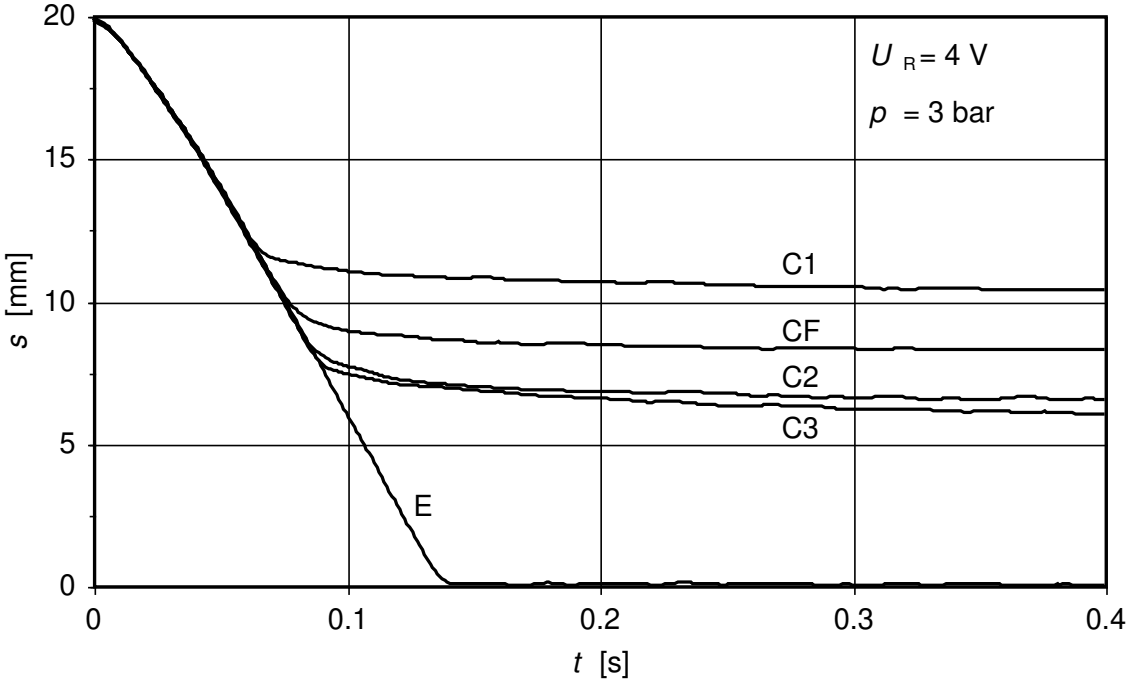

Bild 5: Verlauf des Greifvorganges für verschiedene Kabel bei mittleren Werten für Druck und Drosselstellung

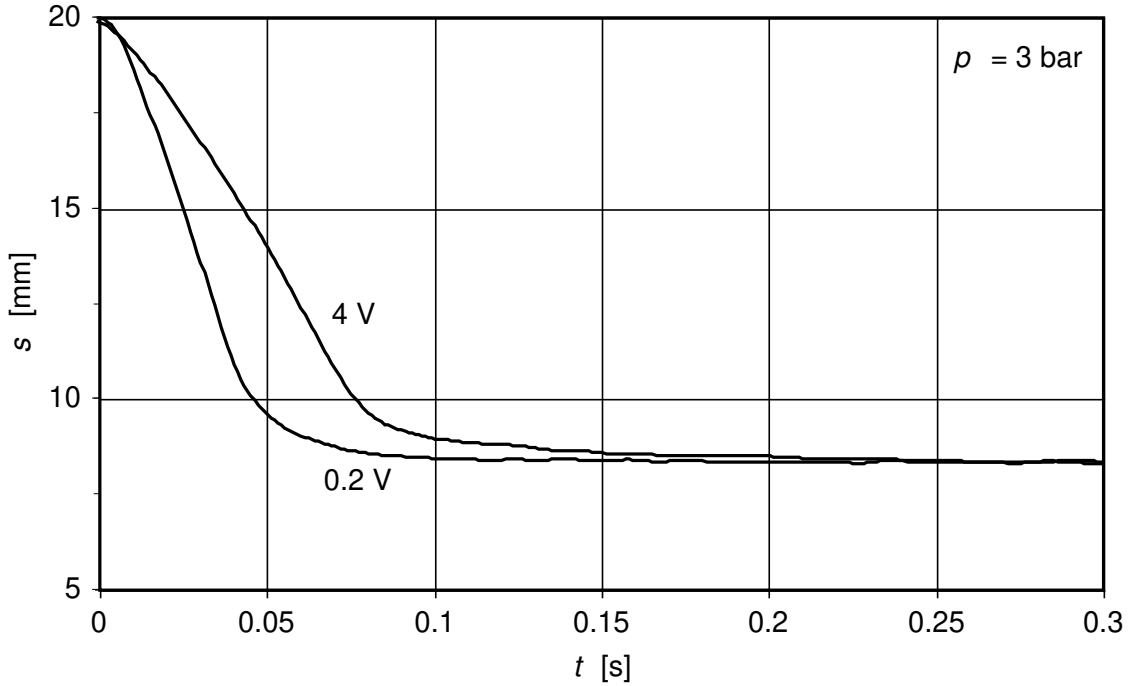

Bild 6: Verlauf des Greifvorganges bei verschiedenen Drosselstellungen (U_R = 0.2 V bzw. U_R = 4 V) für Kabelbaum CF

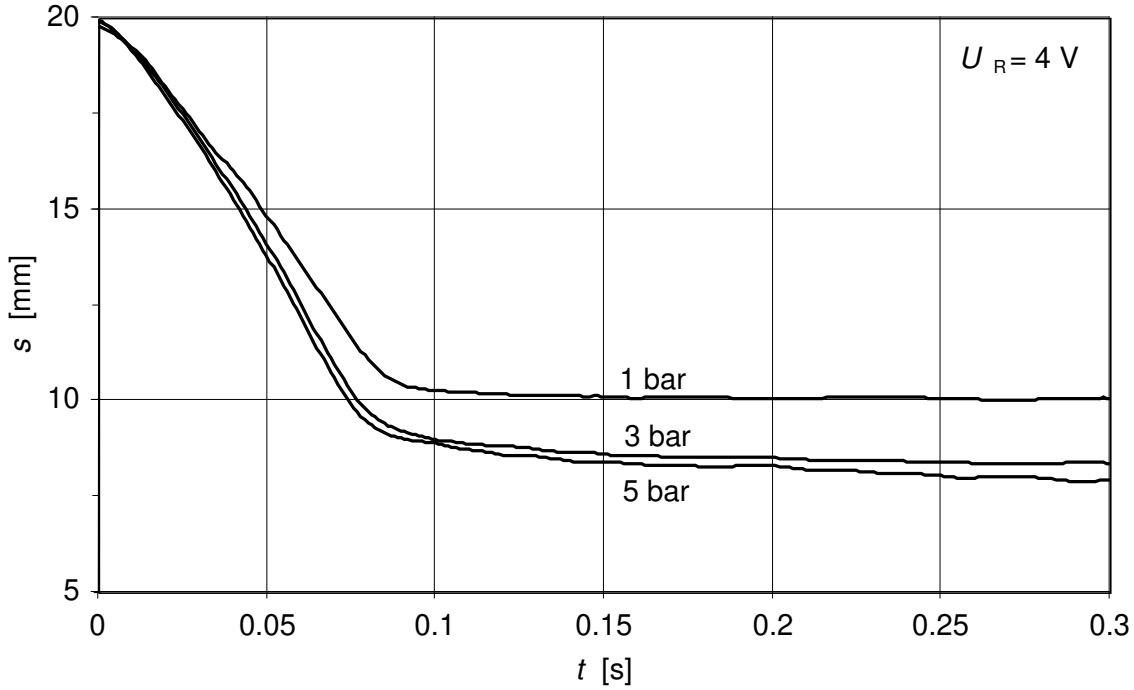

Bild 7: Verlauf des Schließvorganges bei verschiedenen Drücken für Kabelbaum CF